



(12) Ausschließungspatent

(11) DD 298 850 A5

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1
Patentgesetz der DDR
vom 27.10.1983
in Übereinstimmung mit den entsprechenden
Festlegungen im Einigungsvertrag

5(51) G 02 B 1/10

DEUTSCHES PATENTAMT

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) DD G 02 B / 337 507 0

(22) 02.02.90

(44) 12.03.92

(71) siehe (73)

(72) Kaiser, Hans, Prof.; Kaiser, Hans-Christoph, Dr.; Hacker, Erik, Dr. rer. nat.; Lauth, Hans, Dipl.-Phys.; Löttsch, Sabine, Dipl.-Math.; Wulff, Rüdiger, Dipl.-Chem., DE

(73) Jenoptik Carl Zeiss JENA GmbH, Carl-Zeiss Straße 1, O - 6900 Jena, DE

(54) Vielschicht-Entspiegelungsbelag

(55) Brechzahl; breitbandig; Entspiegelung; Substanz, hochbrechend; Substanz, niedrigbrechend; Reflexion; Schichtdicke; Schichtreihung; Spektralbereich; Substrat

(57) Die Erfindung bezieht sich auf einen Vielschicht-Entspiegelungsbelag insbesondere zur Minderung der Reflexion von Licht an Glas-Grenzflächen im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich. Die Erfindung ist in allen Bereichen der Technik anwendbar, wo es um die breitbandige Entspiegelung optischer Elemente geht, die im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich transparent sind. Der Vielschicht-Entspiegelungsbelag besteht aus mindestens acht auf dem zu entspiegelnden Substrat in der folgenden Schichtreihung mit den angegebenen geometrischen Dicken angeordneten Einzelschichten:

Schichtzahl	Substanz	geometrische Schichtdicke d [Nanometer]	Brechzahl n
Substrat	Glas		$\geq 1,45$
1	H	$11,5 \leq d \leq 17,5$	$\geq 2,0$
2	L	$43,5 \leq d \leq 55,0$	$\leq 1,6$
3	H	$33,0 \leq d \leq 45,0$	$\geq 2,0$
4	L	$15,0 \leq d \leq 22,0$	$\leq 1,6$
5	H	$110,0 \leq d \leq 144,5$	$\geq 2,0$
6	L	$17,0 \leq d \leq 24,5$	$\leq 1,6$
7	H	$26,5 \leq d \leq 34,5$	$\geq 2,0$
8	L	$111,0 \leq d \leq 126,0$	$\leq 1,6$
Superstrat	Luft		1,0003

Patentansprüche:

1. Vielschicht-Entspiegelungsbelaag zur Minderung der Reflexion von niedrigbrechenden Substraten im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich, bestehend aus einer hochbrechenden schichtbildenden Substanz H mit einer Brechzahl $n_H \geq 2,0$ und aus einer niedrigbrechenden schichtbildenden Substanz L mit einer Brechzahl $n_L \leq 1,6$, wobei beide schichtbildenden Substanzen alternierend auf dem Substrat angeordnet sind, gekennzeichnet dadurch, daß auf dem zu entspiegelnden Substrat mindestens acht Einzelschichten in der folgenden Schichtreihung mit den angegebenen geometrischen Dicken angeordnet sind:

Schichtzahl	Substanz	geometrische Schichtdicke d (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat			$\geq 1,45$
1	H	$11,5 \leq d \leq 17,5$	$\geq 2,0$
2	L	$43,5 \leq d \leq 55,0$	$\leq 1,6$
3	H	$33,0 \leq d \leq 45,0$	$\geq 2,0$
4	L	$15,0 \leq d \leq 22,0$	$\leq 1,6$
5	H	$110,0 \leq d \leq 144,5$	$\geq 2,0$
6	L	$17,0 \leq d \leq 24,5$	$\leq 1,6$
7	H	$26,5 \leq d \leq 34,5$	$\geq 2,0$
8	L	$111,0 \leq d \leq 126,0$	$\leq 1,6$
Superstrat	Luft		1,0003

2. Vielschicht-Entspiegelungsbelaag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die hochbrechende schichtbildende Substanz H mindestens teilweise aus CeO_2 oder ZrO_2 oder TiO_2 oder Ta_2O_5 oder Nb_2O_5 oder HfO_2 oder Y_2O_3 oder ThO_2 oder BeO oder ZnS besteht.
3. Vielschicht-Entspiegelungsbelaag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die niedrigbrechende Substanz L mindestens teilweise aus MgF_2 oder SiO_2 oder ThF_4 oder LaF_3 oder CeF_3 oder $\text{Na}_3(\text{AlF}_4)$ besteht.
4. Vielschicht-Entspiegelungsbelaag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die Einzelschichten des Schichtsystems folgende geometrische Dicken und Brechzahlen aufweisen:

Schicht-Nr.	Brechzahl	Geometrische Dicke d (Nanometer)
Substrat	1,45–1,60	
1	$\geq 2,1$	15,08
2	1,38	47,72
3	$\geq 2,1$	37,87
4	1,38	16,86
5	$\geq 2,1$	115,90
6	1,38	23,50
7	$\geq 2,1$	28,35
8	1,38	124,60
Superstrat	1	

5. Vielschicht-Entspiegelungsbelaag nach Anspruch 4, gekennzeichnet dadurch, daß die niedrigbrechende schichtbildende Substanz L Magnesiumfluorid (MgF_2) ist und die hochbrechende schichtbildende Substanz H Titandioxid (TiO_2) ist.
6. Vielschicht-Entspiegelungsbelaag nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß die Einzelschichten des Schichtsystems folgende geometrischen Dicken und Brechzahlen aufweisen:

Schicht-Nr.	Brechzahl	Geometrische Dicke d (Nanometer)
Substrat	1,45–1,60	
1	$\geq 1,9$	16,75
2	1,38	44,62
3	$\geq 1,9$	41,77
4	1,38	19,87
5	$\geq 1,9$	143,90
6	1,38	18,25
7	$\geq 1,9$	34,03
8	1,38	120,70
Superstrat	1	

7. Vielschicht-Entspiegelungsbelag nach Anspruch 6, gekennzeichnet dadurch, daß die niedrigbrechende schichtbildende Substanz L Magnesiumfluorid (MgF_2) ist und die hochbrechende schichtbildende Substanz H Zirkoniumdioxid (ZrO_2) ist.

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft einen Vielschicht-Entspiegelungsbelag insbesondere zur Minderung der Reflexion von Licht an Glas-Grenzflächen im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich. Die Erfindung ist in allen Bereichen der Technik anwendbar, wo es um die breitbandige Entspiegelung optischer Elemente geht, die im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich transparent sind. Die Erfindung ist speziell zu Entspiegelung von optischen Elementen aus Gläsern, Plasten oder Kristallen für transmittierende Anwendungen in optischen Anordnungen und Geräten geeignet, deren Funktion auf der Verwendung verschiedener optischer Kanäle beruht.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

In der Optik werden traditionell Beschichtungen aus ein oder zwei Einzelschichten zur Entspiegelung optischer Elemente aus Gläsern, Plasten, Kristallen u. dgl. insbesondere dann technisch genutzt, wenn sich der spektrale Anwendungsbereich auf eine Lichtwellenlänge oder auf ein sehr schmales Spektralband beschränkt. Ursache dafür ist die Entspiegelungsbedingung, die bei einer optischen Dicke $n_i d_i$ der Einzelschichten gleich einem Viertel der Lichtwellenlänge λ_0 definierte Beziehungen zwischen den Schichtbrechzahlen n_i und den Substrat- n_s bzw. Superstratbrechzahlen $n_{s'}$ erfordern ($n_1^2 = n_s n_{s'}$ für eine Einzelschicht, $n_2^2 n_s = n_1^2 n_{s'}$ bzw. $n_1 n_2 = n_s n_{s'}$ für eine Zwelfschicht mit Zählung der n_i beginnend mit der am Substrat anliegenden Schicht), die aufgrund der geringen Zahl der frei wählbaren Parameter lediglich bei einer bzw. zwei Wellenlängen zur Null-Reflexion führen können (V-Entspiegelung bzw. W-Entspiegelung). Beispielsweise ist bei Anwendung eines 2-Schichtsystems mit gleichen optischen Dicken der Einzelschichten und entsprechenden Brechzahlen möglich, nahezu perfekte Entspiegelungen bei einer Wellenlänge zulasten einer reduzierten Bandbreite zu erreichen. Im allgemeinen ist jedoch aufgrund der verfügbaren Brechzahlen schichtbildender Materialien die Sicherung der geforderten Beziehung zwischen Substrat- und Schichtbrechzahlen besonders bei Gläsern mit Brechzahlen im Bereich von 1,45 ... 1,9 problematisch.

Für die häufig erforderliche breitbandige Entspiegelung optischer Elemente über den gesamten sichtbaren Spektralbereich von ca. 400 bis 700 nm sind eine Vielzahl von Lösungen bekannt, die auf Vielschicht-Antireflexbelägen beruhen. Da keine allgemeingültigen systematischen Methoden zur Ermittlung der Designs von Vielschicht-Entspiegelungsbelägen existieren, sind gegenwärtig intuitive trial-and-error-Methoden die vorherrschenden Verfahren zur Bestimmung der Startsysteme für Designs, die dann durch bekannte Näherungs- und Optimierungstechniken (graphische Methoden, Rechneroptimierung) häufig unter Berücksichtigung des dispersiven Verhaltens und der optischen Verluste der eingesetzten Medien weiter verbessert werden.

Ein Spezialfall der Ermittlung der Designs von Vielschicht-Entspiegelungsbelägen beruht auf der klassischen Lösung von JUPNIK (z. B. in „Physics of Thin Films“, Vol. 2, p. 272, editors: G. HASS and R. E. THUN, Academic Press) auf der Basis von Viertelwellenlängen-Systemen, die zu definierten Proportionalitätsbeziehungen zwischen den Schichtbrechzahlen und den angrenzenden Medien führen:

$$\frac{n_k}{n_a} = \dots = \frac{n_{i+1}}{n_{i+2}} = \frac{n_i}{n_{i+1}} = \frac{n_{i-1}}{n_i} = \dots = \frac{n_s}{n_1}$$

mit $i = 1 \dots k$ und

$$n_a < n_k < \dots < n_{i+2} < n_{i+1} < n_i < n_{i-1} < \dots < n_1 < n_s$$

Speziell zur Lösung der Problematik einer für die Massenproduktion geeigneten breitbandigen Entspiegelung von niedrigbrechenden optischen Elementen wurden z. B. in den US-Patentschriften 3185020 und 3604784 3-Schicht-Entspiegelungsbälge vorgeschlagen, die auf dem klassischen $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$ -Design (W. F. GEFFKEN, D-RP 758767) beruhen. Durch Einfügen einer hochbrechenden Halbwellenschicht zwischen die beiden Viertelwellenschichten kann die für eine Zweifachschicht charakteristische geringe Restreflexion über eine größere Bandbreite erreicht werden. Derartige Bälge besitzen bei Erfüllung der Brechzahlbedingung $n_2^2 = n_1 n_3 = n_s n_a$ für drei Wellenlängen Nullstellen der Reflexion. Diese Nullstellen liegen symmetrisch zur Schwerpunktwellenlänge λ_0 , wenn die Bedingungen $n_1^2 = n_s n_2$ und $n_3^2 = n_2 n_a$ erfüllt sind. Diese 3-Schicht-Entspiegelungssysteme wie auch die bzgl. n_1 und d_1 optimierten 3-Schichtsysteme, die dann keine Viertelwellenlängendesigns mehr sind (siehe z. B. H. A. MCLEOD „Thin Film Optical Filters“, 2nd ed., ADAM HILGER Ltd, Bristol, 1986), gewährleisten im Vergleich zu 1- und 2-Schicht-Systemen eine effektive Minderung der Reflexion über einen wesentlich breiteren Spektralbereich. Wie die oben angegebenen Gleichungen jedoch zeigen, sind die Beziehungen zwischen der Substratbrechzahl und den Brechzahlen der 1. und 3. Schicht (n_1, n_3) kritisch und aufgrund der in der Natur nur beschränkt verfügbaren Schichtbrechzahlen für die technisch wichtigen Substratbrechzahlen $n_s = 1,45 \dots 1,9$ nicht immer realisierbar. Zur Verbesserung der Design-Flexibilität von Entspiegelungsbälgen sind z. B. in den US-Patentschriften 3432225 und 3565509 Lösungen angegeben, bei denen in herkömmlichen 3- oder 4-Schicht-Systemen die $\lambda/2$ -Schichten aus hochbrechenden Substanzen und/oder die $\lambda/4$ -Schichten aus mittelbrechenden Substanzen durch 2 bis 3 dünnere, brechzahlifferenten Schichten mit einer summarisch äquivalenten optischen Dicke ersetzt werden. Dadurch ist es möglich, die Anpassungsmöglichkeiten an verschiedene Substratbrechzahlen zu verbessern, ohne jedoch die Bandbreite der Entspiegelungswirkung wesentlich zu beeinflussen. Ein für die kommerzielle Massenproduktion besonderer Nachteil dieser Lösungen besteht in der Verwendung extrem dünner Schichten zur Approximation der $\lambda/4$ - bzw. $\lambda/2$ -Schichten, die im allgemeinen Toleranzprobleme verursachen, die insbesondere auf Schwierigkeiten bei der Monitorierung extrem dünner Schichten mit Inhomogenitäten und Instabilitäten der Brechzahlen sowie optischen Verlusten beruhen. Die Verwendung von 4-Schicht-Entspiegelungsbälgen ergibt im allgemeinen eine gegenüber 3-Schicht-Designs verbesserte Bandbreite. Beispiel dafür ist eine nach JUPNIK ermittelte Design-Struktur mit der Schichtfolge:

Glas- $\lambda/4$ - $\lambda/2$ - $\lambda/4$ - $\lambda/4$ -Luft

in der die Brechzahlen der Gleichung:

$$n_1 n_4 = n_2 (n_s n_a)^{1/3}$$

genügen müssen. Zur technischen Realisierung eines solchen Bälges sind vier verschiedene schichtbildende Materialien mit entsprechenden Gebrauchswerteigenschaften erforderlich, die häufig nur näherungsweise die theoretischen Bedingungen erfüllen und in der Regel durch spezifische Probleme im Beschichtungsprozeß (Monitorierung, Instabilität und Inhomogenität der Brechzahlen, Kompatibilität, optische Verluste, Fraktionierung, Dissoziation usw.) die kommerzielle Massenproduktion beeinträchtigen. Ein Beispiel für einen 4-Schicht-Entspiegelungsbälge mit vier Schichtsubstanzen ist in der US-PS 3463574 angegeben.

Zur Beseitigung dieser Nachteile wurde in der US-PS 3781090 speziell für ein 4-Schicht-System ein alternatives Design-Modell vorgeschlagen, das eine hohe Flexibilität bei der Variation der optischen bzw. geometrischen Dicken der Einzelschichten zur Kompensation von material- oder schichtstrukturbedingten Brechzahlabweichungen gestattet, ohne jedoch die Zahl der erforderlichen Schichtsubstanzen zu reduzieren. Ein dickenoptimierter 4-Schichtbälge, der mit nur zwei Substanzen auskommt, ist beispielsweise von C. J. VAN DER LAAN und H. I. FRANKENA in Proceedings of SPIE, Vol. 401, „Thin Film Technologies“ (1983) p. 117 beschrieben. Die Bandbreite der Entspiegelungswirkung dieses Bälges bleibt jedoch auf den visuellen Spektralbereich beschränkt.

Für Vielschicht-Entspiegelungsbälge, die zu ihrer Realisierung nur zwei schichtbildende Substanzen benötigen, wurden Lösungen angegeben, die zur Approximation nicht verfügbarer Brechzahlen entweder auf der Äquivalentschicht-Theorie oder auf der Synthetisierung theoretisch erforderlicher Brechzahlen durch Bildung von Mischschichten beruhen. Beispielsweise ist in der US-PS 3565509 eine Lösung angegeben, in der symmetrische Anordnungen von Schichten aus einer hoch- und einer niedrigbrechenden Substanz im Sinne einer Äquivalentschicht die theoretisch erforderlichen Brechzahlen von Einzelschichten in herkömmlichen Schicht-Strukturen approximieren, wobei jedoch die Äquivalenzbedingung (äquivalente Brechzahlen und Schichtdicken) nur für eine Wellenlänge erfüllt ist. In derartigen Schicht-Strukturen ist es zur Realisierung optimaler Entspiegelungs-Bandbreiten erforderlich, daß die optische Dicke der vom Substrat aus gesehen 3. Schicht kleiner sein muß als die Summe aus der Dicke der unmittelbar am Substrat anliegenden Schicht und $\lambda_0/2$.

Ein Beispiel für die Synthetisierung von Brechzahlen durch Mischschichtbildung für Entspiegelungsbeläge ist in der US-PS 3 176 574 angegeben, in der vorgeschlagen wird, die theoretisch erforderlichen Brechzahlen oder Brechzahlprofile durch Co-Verdampfen von zwei brechzahldifferenten Materialien zu realisieren, wobei die Brechzahlen über die entsprechenden Volumenanteile beider Substanzen in der Schicht entsprechend bekannter Mischungsformeln (z.B. R. JACOBSSON in „Physics of Thin Films“, Vol. B, p. 16, editors: G. HASS, M. H. FRANCOMBE and R. W. HOFFMAN, Academic Press, 1975) eingestellt werden. Diese Methode erfordert jedoch technisch aufwendige Mittel zur präzisen Steuerung der Verdampfung aus zwei Substanzquellen oder ein Verdampfen von Substanzmischungen ohne Fraktionierungseffekte.

Für 5-Schicht-Entspiegelungsbeläge, die auf klassischen $\lambda_0/4$ -Designs beruhen, gelten bezüglich ihrer Anwendbarkeit und Flexibilität die bereits bei Entspiegelungsbelägen mit geringeren Schichtzahlen genannten Restriktionen hinsichtlich der Brechzahlproportionalität. Diese Probleme sind besonders akut, wenn die Lösungen eine hohe Sensibilität und Instabilität in bezug auf Brechzahlabweichungen aufweisen. Obwohl diese Sensibilität durch Variation der optischen Dicken auch bei 5-Schicht-Belägen in gewissen Grenzen ausgeglichen werden können (US-PS 3 858 965, US-PS 3 922 068), bleiben die mit dem erforderlichen Einsatz mehrerer Schichtmaterialien verbundenen Nachteile erhalten.

Prinzipielle fertigungstechnische Probleme bestehen auch dann, wenn Vielschicht-Entspiegelungssysteme aus 6...7 Einzelschichten aufgebaut werden, die auf einem aus zwei Substanzen bestehenden Pseudo-Äquivalentschichtdicken-Design beruhen, wie beispielsweise in den US-Patentschriften 3 799 653 und 3 960 441 vorgeschlagen wurde.

Alle bisher genannten Lösungen besitzen den grundsätzlichen Nachteil, daß ihre Entspiegelungswirkung auf den visuellen Spektralbereich mit Lichtwellenlängen von ca. 400 bis 700 nm beschränkt ist. Dies trifft auch auf Lösungen zu, bei denen zur Erhöhung der Designflexibilität Mehrfachhalbwellen-Schichten Anwendung finden (G. W. DEBELL, Proceedings of SPIE, Vol. 401, „Thin Film Technologies“, p. 127). Für viele optische Geräte Lösungen ist jedoch eine Erweiterung der Entspiegelungswirkung in den nahen infraroten Spektralbereich erforderlich.

Speziell für optische Geräte mit aktiven Autofokussiereinrichtungen auf der Basis von Infrarotstrahlung (Fotoapparate) wurde in der US-PS 4 726 654 ein 6- bzw. 7-Schicht-Entspiegelungssystem vorgeschlagen, dessen Realisierung mindestens drei Substanzen erfordert, von denen die hochbrechende Substanz eine Mischsubstanz ist. Auf der Grundlage dieses Design konnte mit speziellen Ausführungsformen, die nach der in der US-PS 4 387 960 angegebenen Methode optimiert wurden, eine breitbandige Entspiegelung von Glas realisiert werden, die im Spektralbereich von 400 bis 700 nm eine Restreflexion $< 0,6\%$ und im Bereich von 400 bis 800 nm eine Restreflexion $< 1\%$ gewährleistet. Diese Verschiebung der langwelligen Kante des Entspiegelungsbereiches um ca. 100 nm genügt den Forderungen von aktiven IR-Autofokussiersystemen auf der Basis von herkömmlichen IR-Halbleiter-Bauelementen.

Im optischen Gerätebau besteht jedoch häufig die Forderung nach Breitbandentspiegelungen, die über den gesamten visuellen und nahen infraroten Spektralbereich bis einschließlich der Laserwellenlänge $1,06 \mu\text{m}$ eine effektive Minderung der Reflexion von optischen Elementen gewährleisten. Anwendungsbeispiele sind dabei optische Geräte und Anordnungen z. B. im Vermessungswesen, der Medizintechnik, der Militärtechnik usw., bei denen aus technischen und/oder ökonomischen Gründen verschiedene optische Kanäle durch die gleichen optischen Elemente geführt werden. Typische Beispiele derartiger Kombinationen sind die visuelle und Nachtsicht-Beobachtung, Techniken der aktiven IR-Autofokussierung oder IR-Informationsübertragung sowie Meß- und Bearbeitungsaufgaben mittels $1,06 \mu\text{m}$ - Laserlicht.

Technische Lösungen zur Realisierung einer effektiven Minderung der Reflexion optischer Elemente über den gesamten visuellen und nahen infraroten Spektralbereich einschließlich der Laserwellenlänge $1,06 \mu\text{m}$ sind in der Literatur nicht angegeben.

Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist die effektive Minderung der Reflexion insbesondere von niedrigbrechenden optischen Elementen im visuellen bis infraroten Spektralbereich unter Einbeziehung der Laserwellenlänge $1,06 \mu\text{m}$. Diese breitbandige Entspiegelung soll mit herkömmlichen Materialien und geringem technischen und technologischen Aufwand bei Anwendung konventioneller Aufdampfverfahren realisierbar sein.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Lösungsmöglichkeiten für den Aufbau eines dielektrischen Vielschicht-Entspiegelungsbelages anzugeben, der bei Anwendung auf niedrigbrechenden optischen Elementen im gesamten Spektralbereich von ca. 450...1100 nm eine Restreflexion $< 0,9\%$ gewährleistet und zu seiner Realisierung nur zwei brechzahldifferente Schichtsubstanzen erfordert. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe mit einem Vielschicht-Entspiegelungsbelag zur Minderung der Reflexion von niedrigbrechenden Substraten im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich, bestehend aus einer hochbrechenden schichtbildenden Substanz H mit einer Brechzahl $n_H \geq 2,0$ und einer niedrigbrechenden schichtbildenden Substanz L mit einer Brechzahl $n_L \leq 1,6$, wobei beide schichtbildenden Substanzen alternierend auf dem Substrat angeordnet sind, dadurch gelöst, daß auf dem zu entspiegelnden Substrat mindestens acht Einzelschichten in der folgenden Schichtreihung mit den angegebenen geometrischen Dicken angeordnet sind:

Schichtzahl	Substanz	geometrische Schichtdicke d (Nanometer)	Brechzahl n
Substrat	Glas		$\geq 1,45$
1	H	$11,5 \leq d \leq 17,5$	$\geq 2,0$
2	L	$43,5 \leq d \leq 55,0$	$\leq 1,6$
3	H	$33,0 \leq d \leq 45,0$	$\geq 2,0$
4	L	$15,0 \leq d \leq 22,0$	$\leq 1,6$
5	H	$110,0 \leq d \leq 144,5$	$\geq 2,0$
6	L	$17,0 \leq d \leq 24,5$	$\leq 1,6$
7	H	$26,5 \leq d \leq 34,5$	$\geq 2,0$
8	L	$111,0 \leq d \leq 126,0$	$\leq 1,6$
Superstrat	Luft		1,0003

Mit diesem Design für ein Vielschicht-Entspiegelungssystem ist es unter Verwendung von nur zwei Brechzahlen aus dem Spektrum herkömmlicher schichtbildender Materialien möglich, niedrigbrechende Substrate unter Berücksichtigung der Dispersion im Spektralbereich von ca. 450 nm bis ca. 1100 nm mit einer Restreflexion $\leq 0,9\%$ wirkungsvoll zu entspiegeln. Der Einsatz von technologisch erprobten schichtbildenden Substanzen und das Vermeiden von sehr dünnen Schichten bieten den Vorteil einer Massenfertigung mittels konventioneller Aufdampftechnik, wobei gute schichtoptische Gebrauchswerteigenschaften erzielt werden können.

Zweckmäßigerweise besteht die hochbrechende schichtbildende Substanz H in vorteilhaften Ausführungsformen der Erfindung mindestens teilweise aus CeO_2 oder ZrO_2 oder TiO_2 oder Ta_2O_5 oder Nb_2O_5 oder HfO_2 oder Y_2O_3 oder ThO_2 oder BaO oder ZnS . Die niedrigbrechende Substanz L besteht vorteilhaft mindestens teilweise aus MgF_2 oder SiO_2 oder ThF_4 oder LaF_3 oder CeF_3 oder $\text{Na}_3(\text{AlF}_4)$. Der Einsatz dieser Substanzen sichert bei guter Kompatibilität, niedrigen optischen Verlusten und ausreichenden Resistenzeigenschaften den für die spektralen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelag erforderlichen Brechzahlkontrast. Obwohl der Einsatz von Substanzmischungen denkbar und in speziellen Anwendungsfällen von Vorteil ist, kann der erfindungsgemäße Vielschicht-Entspiegelungsbelag auf einfache Art und Weise durch sequentielles Verdampfen von nur einer niedrigbrechenden und einer hochbrechenden Substanz erzeugt werden.

Eine erste, besonders vorteilhafte Ausführungsform ist in folgender Tabelle in Form der den Einzelschichten zugeordneten geometrischen Dicken und Brechzahlen angegeben.

Schicht-Nr.	Brechzahl	Geometrische Dicke d (Nanometer)
Substrat	1,45–1,60	
1	$\geq 2,1$	15,08
2	1,38	47,72
3	$\geq 2,1$	37,87
4	1,38	16,86
5	$\geq 2,1$	115,90
6	1,38	23,50
7	$\geq 2,1$	28,35
8	1,38	124,60
Superstrat	1	

Mit diesen Schichtparametern lassen sich besonders streulichtarme Vielschicht-Entspiegelungen herstellen, wenn die niedrigbrechende schichtbildende Substanz L Magnesiumfluorid (MgF_2) und die hochbrechende schichtbildende Substanz H Titandioxid (TiO_2) ist.

Eine zweite, besonders günstige Ausführungsform ist in folgender Tabelle in Form der den Einzelschichten zugeordneten geometrischen Dicken und Brechzahlen angegeben.

Schicht-Nr.	Brechzahl	Geometrische Dicke d (Nanometer)
Substrat	1,45–1,60	
1	$\geq 1,9$	16,75
2	1,38	44,62
3	$\geq 1,9$	41,77
4	1,38	19,87
5	$\geq 1,9$	143,90
6	1,38	18,25
7	$\geq 1,9$	34,03
8	1,38	120,70
Superstrat	1	

Mit dieser Parametrierung der Einzelschichten können besonders laserfeste Vielschicht-Entspiegelungsbeläge realisiert werden, wenn die niedrigbrechende schichtbildende Substanz L Magnesiumfluorid (MgF_2) ist und die hochbrechende schichtbildende Substanz H Zirkoniumdioxid (ZrO_2) ist. Beide der .g. Substanzkombinationen besitzen eine ausgezeichnete Kompatibilität, lassen sich mit herkömmlichen Verdampfungsverfahren, der aber auch durch weitere Beschichtungstechniken mit zufriedenstellender schichtoptischer Qualität und hervorragenden Resistenzeigenschaften gegenüber mechanischen, chemischen, klimatischen .ä. Einflüssen darstellen.

Mit dem erfindungsgemäßen Schichtsystem für einen Vielschicht-Entspiegelungsbelag ist es bei komplexer Gewährleistung guter Applikationseigenschaften möglich, insbesondere niedrigbrechende optische Elemente vom visuellen bis nahen infraroten Spektralbereich einschließlich der Laserwellenlänge $1,06\mu\text{m}$ mit einer Restreflexion $\leq 0,9\%$ zu entspiegeln.

Mit dem erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelag ausgerüstete optische Geräte und Anordnungen besitzen für optische Kanäle im Bereich vom visuellen bis zum nahen infraroten Spektralbereich bei geringen optischen Verlusten eine hohe Transmission und Laserfestigkeit.

Ausführungsbeispiele

Die Erfindung soll anhand von zwei Beispielen näher erläutert werden.

Als erstes Beispiel soll das dielektrische Schichtsystem für einen erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelag angegeben werden, der im Spektralbereich von 450 nm bis 1100 nm eine Restreflexion $R \leq 0,6\%$ aufweist und geringe Streulichtverluste besitzt. Dazu wird ein Substrat aus BK-7, Kieselglas o. dgl. mit acht Einzelschichten aus der hochbrechenden schichtbildenden Substanz Titandioxid (TiO_2) und der niedrigbrechenden schichtbildenden Substanz Magnesiumfluorid (MgF_2) belegt, die beginnend mit TiO_2 alternierend auf das Substrat abgeschieden werden. Beide Substanzen liefern bei entsprechender Wahl der Schichtherstellungsparameter die zur Realisierung der optischen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelages erforderlichen Brechzahlen bzw. Brechzahl dispersionen. In Tabelle 1 sind in einer Gesamtübersicht die jeweils relevanten Schichtparameter des erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelages angegeben.

Als zweites Beispiel soll das dielektrische Schichtsystem für einen erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelag angegeben werden, der im Spektralbereich von 450 nm bis 1100 nm eine Restreflexion $R \leq 0,85\%$ aufweist und eine hohe Laserresistenz besitzt. Dazu wird eines der oben bereits genannten Substrate mit acht Einzelschichten aus der hochbrechenden schichtbildenden Substanz Zirkoniumdioxid (ZrO_2) und der niedrigbrechenden schichtbildenden Substanz Magnesiumfluorid (MgF_2) belegt, die beginnend mit ZrO_2 alternierend auf das Substrat aufgebracht werden. Beide Substanzen liefern bei entsprechender Wahl der Schichtherstellungsparameter die zur Realisierung der optischen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelages erforderlichen Brechzahlen bzw. Brechzahl dispersionen. In Tabelle 2 sind in einer Gesamtübersicht die jeweils relevanten Schichtparameter des erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelages angegeben.

Die Herstellung der in beiden Ausführungsbeispielen angegebenen Vielschicht-Entspiegelungsbeläge kann mit Hilfe konventioneller Hochvakuumbeschichtungstechnik beispielsweise durch Elektronenstrahlverdampfen der Ausgangsmaterialien in bekannter Weise erfolgen. Die in den Beispielen genannten Substanzkombinationen sind kompatibel und besitzen gute schichtoptische Gebrauchswerteigenschaften. Es ist durch geringfügige Modifizierung der in Tabelle 1 und Tabelle 2 angegebenen Schichtdicken des erfindungsgemäßen Vielschicht-Entspiegelungsbelages vorteilhaft möglich, anstelle des niedrigbrechenden Fluorides MgF_2 das niedrigbrechende Oxid SiO_2 einzusetzen.

Tabelle 1

Schicht-Nr.	Substanz	Geometrische Dicke d (Nanometer)
Substrat	BK-7	
1	TiO_2	15,08
2	MgF_2	47,72
3	TiO_2	37,87
4	MgF_2	16,86
5	TiO_2	115,90
6	MgF_2	23,50
7	TiO_2	28,35
8	MgF_2	124,60
Superstrat	Luft	

Tabelle 2

Schicht-Nr.	Substanz	Geometrische Dicke d (Nanometer)
Substrat	BK-7	
1	ZrO ₂	16,75
2	MgF ₂	44,62
3	ZrO ₂	41,77
4	MgF ₂	19,87
5	ZrO ₂	143,90
6	MgF ₂	18,25
7	ZrO ₂	34,03
8	MgF ₂	120,70
Superstrat	Luft	